Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 37, No. 1, Mar.-Apr. 2023, p. 145-164

Synoptic-Dynamic Analysis of Heavy Rainfall Leading to Flooding in Golestan Province in March 2019

F. Abdolalizadeh[1*], A.M. Khorshiddoust[2]

Received: 01-10-2022
Revised: 24-12-2022
Accepted: 25-12-2022
Available Online: 25-12-2022

How to cite this article:
Abdolalizade, F., & Mohammad-Khorshiddoust, A. (2023). Synoptic-Dynamic Analysis of Heavy Rainfall Leading to Flooding in Golestan Province in March 2019. *Journal of Water and Soil 37*(1): 145-164. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2022.78803.1203

Introduction

Heavy rains often occur in small areas, but they may be the result of large-scale systems and their energy and moisture are provided from distant areas (Mohamadei et al., 2010). Therefore, identification of synoptic systems is of great importance in order to predict precipitation. Although rain has many positive effects on human life, heavy rain can cause one of the most dangerous and damaging natural disasters, namely floods. Every year, floods cause many human and financial losses in different regions of the world. Floods are more effective in vulnerable areas and cause the loss of human lives, damage to property and products, disruption of transportation and services, and other economic losses (Kheradmand *et al*., 2018). In March 2019, heavy rains occurred in Golestan province, which caused flooding in parts of this province, especially in the cities of Gonbad-Kavus and Aqqala. Most of this heavy rain and flood occurred in the Gorgan River basin. According to meteorological reports, the rain started from the night of 03.17.2019 and continued until 03.21.2019, although the heaviest rainfall occurred from the 03.18.2019. The volume of the flood was so great that the dams on the Gorgan River could not accommodate it. According to the reports of the regional water company of Golestan province, the flood entered the Bostan dam at 1 am on 03/19/2019, and after passing through it, entered the Vashmgir dam at 6 am, and then on 03.21.2019 entered the city of Aqqala. The damage of this flood was estimated at about 4800 billion Tomans, which includes damage to 17800 residential units, damage to farms, transportation infrastructure, 40% reduction in tourism, damage to industrial units, unemployment of about 3000 people, and damage to the nomads of the province. (Islamic Republic News Agency, 04.09.2019). Considering the heavy damage caused by the mentioned heavy rain and flood in Golestan province, it is necessary to identify and analyze the causes of its occurrence in order to plan and take the necessary measures to prepare and deal with such incidents.

Materials and Methods

The study area is Gorganrood watershed, most of this area is located in Golestan province. Golestan province is one of the northern provinces of the country and is located in the southeast of Caspian sea. In this research, in order to identify and analyze the heavy rain that occurred in Golestan province in March 2019, which led to severe flooding, several types of data were used (data from meteorological stations, NCEP/NCAR reanalyzed data, MODIS satellite images, GPM precipitation products). First, using the rainfall data of the synoptic stations located in the Gorgan River watershed, the time of heavy rainfall was identified, and then using the data of the aforementioned stations and several stations outside the basin, a rainfall zoning map was prepared. MODIS satellite images were also used to check the position of precipitation system and cloudiness of region. Using GPM satellite rainfall products called IMERG, which were extracted on a half-hourly basis, as well as the main synop reports of meteorological stations, which are reported on a six-hourly basis, the intensity of rainfall was investigated. In addition, the physical conditions of the basin were investigated using the topography and slope map of the basin prepared from the DEM layer of the region. In the following, using the reanalyzed data of the NCEP/NCAR

1- Meteorologist, I.R. Iran Meteorological Organization, East Azerbaijan Bureau of Meteorology
(*- Corresponding Author Email: f.abdolalizadeh@tabrizu.ac.ir)
2- Professor of Climatology Department, Tabriz University, Tabriz, Iran

database (National Center for Environmental Prediction - National Center for Atmospheric Research of the United States), synoptic maps including maps of land surface pressure, geopotential height of the upper atmosphere, Omega (indicates the speed of vertical movements of the atmosphere), wind direction and speed, moisture flux convergence function, frontal function, specific humidity, atmospheric precipitable water and Hoff-Müller diagram were drawn to identify the synoptic and dynamic factors of the mentioned precipitations.

Results and Discussion

The results of the present research in the analysis of flood factors can be summarized as follows:

- Survey of the topography and slope of the Gorganrood basin revealed that the physical conditions of the basin are such that the potential for flooding is high.
- The amount of rainfall in 24, 6 and a half hour intervals in the study area were investigated and it was shown that the rainfall occurred on March 17, 18 and 19, especially on March 18, in terms of the intensity of rainfall were very intense.
- Investigation of the state of the middle troposphere showed that the formation of the Rossby wave and the meridional expansion of one of its troughs, along with the creation of a positive vorticity that dominated the studied area on the seventeenth of March, are the main factors in the creation of a baroclinic atmosphere and the dynamic ascent of air.
- Investigation of the synoptic-dynamic conditions of the lower levels of the troposphere showed that in the lower levels of the low-altitude synoptic system with closed meters, at the same time as the deep trough reigns over the region, it has been formed and strengthened during peak rainfall times and has led to a strong rise of air.
- Investigating the state of atmospheric humidity in the study area and identifying sources of moisture supply using special humidity maps, moisture flux convergence function and atmospheric flow paths were carried out.
- Investigating the omega variable in the vertical profile of the atmosphere using the Hoff-Mueller diagram showed that during the times of precipitation events, upward movements prevailed in all levels of the troposphere, especially during the peak of precipitation, the upward movements became more intense in the lower levels.
- Identifying the type of clouds using MODIS products showed that during heavy rains, especially on March 18, deep convective clouds with a high density of water were formed in the region, which extended up to a height of 300 hectopascals and were very thick.

Keywords: Flood, Gorganrood basin, Heavy rainfall, Moisture flux convergence

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۷، شماره ۱، فروردین- اردیبهشت ۱۴۰۲، ص. ۱۶۴-۱۴۵

تحلیل سینوپتیکی-دینامیکی بارش سنگین منجربه سیل استان گلستان در ماه مارس ۲۰۱۹

فیروز عبدالعلی‌زاده[1*]- علی محمد خورشید دوست[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

چکیده

طی روزهای هفدهم تا بیست و یکم ماه مارس ۲۰۱۹ (۲۶ اسفند ۱۳۹۷ تا ۱ فروردین ۱۳۹۸) بارش باران سنگین در استان گلستان (حوضه آبریز گرگانرود) باعث ایجاد سیل و آبگرفتگی در مسیر گرگانرود گردید که خسارات بسیار زیادی به شهرها، روستاها و بخش کشاورزی وارد آورد. لذا در این تحقیق اقدام به بررسی و تجزیه و تحلیل عوامل رخداد سیل مذکور به ویژه عوامل سینوپتیکی-دینامیکی وقوع بارش سنگین، گردید. جهت تحلیل سینوپتیکی-دینامیکی بارش سنگین، با استفاده از منابع داده‌ای مختلف (داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک، پایگاه NCEP/NCAR، محصولات ماهواره MODIS و محصولات ماهواره GPM) ابتدا زمان اوج بارش‌ها و شدت بارش مورد شناسایی قرار گرفت و سپس نقشه‌های سینوپتیک (نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل در سطوح میانی و زیرین تروپوسفر، چرخندگی نسبی، امگا، سمت و سرعت باد، همگرایی شار رطوبت، تابع جبهه‌زایی، رطوبت ویژه جو و نمودار هوف-مولر) تهیه گردیدند و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که بارش سنگین از ساعت ۱۸ (به وقت جهانی[3]) روز هفده مارس شروع شده و تا ساعت ۱۸ روز هجده مارس ادامه داشته است و اوج شدت بارش‌ها در روز هجدهم مارس در اکثر ایستگاه‌ها بین ساعت‌های ۰۶ تا ۱۲ و ۱۲ تا ۱۸ بوده است. بررسی نقشه‌های سینوپتیک بیان داشت، منشأ سیستم بارشی تراف عمیق واقع بر بستر موج رامسبی می‌با شد که در اواخر روز هفدهم مارس به منطقه مورد مطالعه رسیده و باعث شکل‌گیری سیکلونی عمیق در این ناحیه شده است و با تزریق رطوبت از آب‌های جنوبی ایران و دریای خزر توسط جریانات جوی به داخل سیکلون وقوع بارش‌های سنگین را منجر گشته است. از سوی دیگر، توپوگرافی و شیب حوضه شرایط لازم را برای رخداد سیل فراهم آورده است.

واژه‌های کلیدی: بارش سنگین، حوضه گرگانرود، سیل، همگرایی شار رطوبت

مقدمه

بارندگی‌های سنگین اغلب در مناطق کوچک رخ می‌دهند، اما ممکن است حاصل سیستم‌های بزرگ مقیاس بوده و انرژی و رطوبت آن‌ها از مناطق دوردست تأمین شده باشد (Mohamadei *et al*., 2010). بارش یکی از پدیده‌های جوی است که از تغییرپذیری زمانی و مکانی زیادی برخوردار است و عوامل مختلفی در وقوع آن نقش دارند؛ به همین دلیل مسئله پیش‌بینی بارش از پیچیدگی زیادی برخوردار است. رویدادهای بارش حدی می‌توانند منجربه آب‌های سطحی اضافی و سیل شده و خسارات اجتماعی زیادی را به دلیل توسعه شهرنشینی ایجاد نمایند (Karianne *et al*., 2023).

سیل هر ساله خسارات جانی و مالی فراوانی در مناطق مختلف دنیا به بار می‌آورد. سیل بیشتر در مناطق آسیب‌پذیر تأثیرگذار است و باعث از دست رفتن زندگی انسان‌ها، آسیب به دارایی و محصولات، اختلال در حمل و نقل و خدمات‌رسانی و سایر خسارات اقتصادی می شود (Kheradmand *et al*., 2018). تعداد افرادی که در معرض خطرات ناشی از سیل قرار دارند بیش از همه خطرات طبیعی دیگر است (مرکز کاهش مخاطرات آسیا[4]، ۲۰۱۱) که یکی از دلایل آن می‌تواند افزایش سیل در ۳۰ سال گذشته باشد (Freer *et al*., 2011).

۱- کارشناس هواشناسی سینوپتیک، سازمان هواشناسی کشور، اداره کل هواشناسی استان آذربایجان شرقی
(*- نویسنده مسئول: Email: f.abdolalizadeh@tabrizu.ac.ir)
۲- استاد گروه آب و هواشناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- ساعت‌های ذکر شده در سراسر مقاله به وقت جهانی (UTC) می‌باشند.

DOI: 10.22067/jsw.2022.78803.1203

4- Asian Disaster Reduction Center (ADRC)

آ گاهی دقیق در مورد عوا مل ر خداد بارش های حدی به منظور پیش‌بینی بهتر آن بسیار مهم می‌باشد (Karianne *et al*., 2023). توپوگرافی، خاک و کاربری اراضی با ممانعت در نفوذ و جذب آب توسط خاک، در تولید سیل مشارکت می کنند. اگر الگوهای سینوپتیکی تولید کننده بارش‌های سنگین شناسایی شوند، چند روز قبل می‌توان با رؤیت شروع توالی الگوهای مختوم به ایجاد سیل، وقوع سیلاب را پیش‌بینی کرد (Ghasemifar *et al*., 2017).

در آخرین روزهای سال ۱۳۹۷ و اوایل ۱۳۹۸ (ماه مارس ۲۰۱۹) بارش‌های شدیدی در استان گلستان به وقوع پیوست که باعث ایجاد سیل و آبگرفتگی در بخش‌هایی از این استان به ویژه در شهرهای گنبد کاووس و آق قلا گردید. عمده این بارش سنگین و سیل در حو ضه گرگانرود رخ داد. طبق گزار شات هوا شنا سی بارندگی از شب ۱۳۹۷/۱۲/۲۶ شروع شد و تا ۱۳۹۸/۱/۱ ادامه داشت که البته بیشترین بارش از صبح ۱۳۹۷/۱۲/۲۷ تا صبح ۱۳۹۷/۱۲/۲۸ اتفاق افتاد. حجم سیلاب به حدی بود که سدهای واقع بر روی گرگانرود توان مهار آن را نداشتند (جدول ۱). براساس گزارشات شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، سیلاب از ساعت ۱ بامداد ۱۳۹۷/۱۲/۲۸ به سد بوستان وارد شد و با عبور از آن در ساعت ۶ صبح ۱۳۹۷/۱۲/۲۸ وارد سد وشمگیر شد و سپس در روز ۱۳۹۸/۱/۱ وارد شهر آق قلا گردید. خسارت این سیل حدود ۴۸۰۰ میلیارد تومان برآورد شد که شامل خسارت به ۱۷۸۰۰ واحد مسکونی، آسیب به مزارع، زیر ساخت‌های حمل و نقل، کاهش ۴۰ درصدی گردشگری، خسارت به واحدهای صنعتی و بیکاری حدود ۳۰۰۰ نفر و آسیب به عشایر استان می‌باشد (خبرگزاری جمهوری اسلامی، ۱۳۹۸/۱/۲۰). با توجه به خسارات سنگینی که بارش سنگین و سیل مذکور در استان گلستان بر جای گذاشت لازم است تا عوامل وقوع آن مورد شناسایی و تحلیل قرار گیرد تا برنامه‌ریزی و اقدامات لازم جهت آمادگی و مقابله در صورت تکرار چنین حوادثی انجام گیرد.

تاکنون مطالعات زیادی در خصوص بارش‌های سنگین و عوامل ایجادکننده آن‌ها در مناطق مختلف دنیا انجام گرفته است. کموشجو و همکاران (Komuscu *et al*., 1998) عوامل هواشناسی ایجاکننده سیلاب‌های روزهای سوم و چهارم نوامبر ۱۹۹۵ ازمیر ترکیه را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان دادند عوامل بارش شدید فرارفت هوای گرم و مرطوب در ترازهای پایین جو، چرخندگی مثبت و واگرایی شدید در ترازهای بالا هستند. رضاکووا و همکاران (Rezacova *et al*., 2005) بارش سنگین آگو ست ۲۰۰۲ در کشور چک را تحلیل کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد گرادیان شدید فشار در قسمت عقب سیکلون که با حرکت کند به سمت شمال شرق اروپای مرکزی پیشروی می کرد همراه با رطوبت زیاد و استیلای چرخندگی مثبت در ترازهای مختلف جو دلایل اصلی بارش سنگین بودند. مسترانجلو و همکاران (Masterangelo *et al*., 2011)، ساز و کار بارش‌های سنگین جنوب شرق ایتالیا را مطالعه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد رودباد سطح پایین (Low-Level Jet Stream) ناشی از الگوی بزرگ مقیاس جوی، یک محیط ناپایدار همرفتی ایجاد کرد که در تمام مدت حضور در منطقه موجب فرارفت توده‌های هوای مرطوب در ترازهای پایین جو شده و منجربه رخداد بارش سنگین گردید.

جدول ۱- حجم سیلاب رودخانه گرگانرود در بازه زمانی ۱۳۹۷/۱۲/۲٦ الی ۱۳۹۸/۱/۸

Table 1- The flood volume of the Gorganrood river in the period from 03.17.2019 to 03/14/2018

مکان اندازه‌گیری سیلاب **Flood measurement location**	حجم سیلاب (میلیون متر مکعب) **Flood volume (million cubic meters)**
خروجی سد گلستان Golestan Dam outlet	130
ورودی میان حوضه (باغه سالیان) The entrance to the middle of the basin (BsgheSalian)	40
ورودی میان حوضه (آراز کوسه) The entrance to the middle of the basin (ArazKooseh)	78
میان حوضه بین سدهای گلستان و وشمگیر Middle of the basin between Golestan and Vashamgir dams	33
ذخیره شده در سدهای بوستان گلستان و وشمگیر Stored in Boostan and Vashemgir Dams	23
جمع کل سیلاب The total flood	304

منبع: شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گلستان

Source: Regional water company of Golestan

دایان و همکاران (Dayan *et al*., 2015)، شرایط جوی منجربه بارش‌های حدی در غرب و شرق مدیترانه را بررسی کردند. ایشان به این نتیجه رسیدند که رطوبت مورد نیاز همرفت‌های شدید نه تنها از دریای مدیترانه بلکه از مناطق دورد ست نیز تأمین می شود. رطوبت از طریق سیستم‌های سینوپتیکی در لایه‌های میانی تروپسفر منتقل می‌شود. گاهی بارش‌های شدید مدیترانه ناشی از ترکیب چندین سیستم جوی در مقیاس‌های مختلف است (ازجمله همرفت محلی، سیستم‌های سینوپتیک و همرفت میان مقیاس). فلونی و همکاران (Feloni *et al*., 2016)، عوامل سینوپتیکی وقوع بارش‌های سنگین فصلی در منطقه آنیکای ایتالیا را مطالعه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد در رخداد بارش‌های پاییزی، گردش سیکلونی از ترازهای میانی تا سطوح پایینی جو تشکیل می شود، بخصوص در سطوح ۸۵۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکالی گردش سیکلونی بسته بر روی مرکز ایتالیا شکل می‌گیرد. شرایط مذکور در فصل زمستان گسترده‌تر می‌شود. بالتاجی و همکاران (Baltaci *et al*., 2017)، سیل ۲۴ آگوست ۲۰۱۵ در منطقه آرتوین ترکیه را از نظر عوامل هوا شنا سی مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان دادند استقرار یک کم‌فشار بریده بر روی شرق دریای سیاه منجر به همگرایی رطوبت در سطوح پایین جو شد و علاوه بر آن انتقال رطوبت توسط جریان‌های گرم شمالی از طریق دریای سیاه و جریان‌های خنک جنوبی شرایط ناپایدار جوی را تشدید کرده و با ایجاد سلول‌های همرفتی بارش شدید به وقوع پیوست. ژنگ و همکاران (Zheng *et al*., 2022)، کانون بارش‌های سنگین کوتاه‌مدت سواحل جنوبی چین را بررسی کردند. نتایج نشان دادند بارش‌های سنگین عمدتاً در مناطق ساحلی رخ می‌دهند و توپوگرافی نقش مهمی در موقعیت کانون‌های بارش سنگین دارد.

قو یدل رحیمی و حاتمی (Gavidel Rahimi and Hatami, 2016) عوامل سینوپتیکی منجربه بارش سنگین ۸ اسفند ۱۳۸۸ ایوانغرب را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد مراکز کمفشار واقع بر روی ایران در سطح زمین و تراف عمیق مستقر بر روی خاورمیانه که ایران در قسمت شرق این ناوه قرار گرفته بود، همچنین تشکیل سردچال انباشته از هوای سرد و مرطوب و جریان رودباد قوی و ایجاد واگرایی در ستون فوقانی جو از عوامل اصلی صعود هوا و بارش سنگین بودند. امیدوار و همکاران (Omidvar *et al*., 2018)، به تحلیل سینوپتیکی-دینامیکی بارش‌های سنگین روزهای ۵ الی ۸ آبان ۱۳۹۴ در استان کرمانشاه پرداختند. تحلیل‌ها نشان دادند گرادیان شدید فشار بین کم‌فشار سودانی و پرفشار اروپایی عامل اصلی ایجاد ناپایداری شدید جوی بود. همچنین ریزش هوای سرد عرض‌های بالا، انتقال رطوبت از عرض‌های پایین و وجود رودباد قوی در سطح ۲۵۰ هکتوپاسکالی بر فراز منطقه از عوامل تشدید کننده بارش بودند. حبیبی و همکاران (Habibi *et al*., 2019) عوامل سینوپتیکی-دینامیکی وقوع سیل بندرعباس در مارس ۲۰۱۴ را شناسایی کردند. بررسی‌ها نشان داد مهمترین عامل ناپایداری جوی سیستم کمفشار دینامیکی است که به صورت یک تراف کمفشار از ترکمنستان به سمت تنگه هرمز کشیده شده بود، همچنین وجود رودباد قوی بر روی استان هرمزگان و انتقال رطوبت از تنگه هرمز در رخداد بارش سنگین مؤثر بودند. میریان و همکاران (Mirian *et al*., 2020)، بارش سنگین ۱۹۷۴/۱۲/۵ در ایران را از نظر سینوپتیکی مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان دادند در زمان رخداد بارش، ناحیه همگرایی قوی در سطح زمین شکل گرفته که منطبق بر ناحیه واگرایی تراز میانی جو بوده و صعود دینامیکی هوا را موجب شده است. حسینی صدر و همکاران (Hoseini Sadr *et al*., 2020)، ساز و کار سینوپتیکی بارش سنگین ۱۴ آوریل ۲۰۱۷ در شمال‌غرب ایران را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان دادند استیلای منطقه چرخندی تراف مدیترانه در تراز میانی جو به همراه رودباد جبهه قطبی در سطوح فوقانی شرایط ناپایداری و صعود هوا را فراهم کرده‌اند و نقشه‌های شار رطوبت نشان دادند منبع رطوبت بارش سنگین دریای سرخ بوده است. بیرانوند و همکاران (Beiranvand *et al*., 2022)، بارش سنگین منجر به سیلاب فروردین ۱۳۹۸ در حوضه آبریز درود بروجرد را مورد ارزیابی قرار دادند. تحلیل سینوپتیکی این رخداد نشان داد وجود یک تراف عمیق با مرکز بسته بر روی شرق دریای مدیترانه و قرارگیری ایران در بخش جلویی این تراف شرایط را برای ورود سیستم‌های کمفشار و صعود هوا فراهم آورده است. وزش رطوبتی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نشان داد منابع تأمین رطوبت بارش سنگین دریای مدیترانه، دریای سرخ و خلیج فارس هستند.

بررسی مطالعات پیشین بیانگر این نکته است که بارش‌های سنگین وابستگی زیادی به سیستم‌های سینوپتیک جوی دارند و از سوی دیگر هر منطقه تحت تأثیر سیستم‌های خاصی می‌باشد؛ بطوریکه برای تحلیل عوامل بارش های سنگین هر منطقه باید سیستم‌های تأثیرگذار بر آن مطقه مورد توجه قرار گیرند. از این رو در تحقیق حاضر به شناسایی سیستم‌های سینوپتیکی منجربه بارش‌های سنگین در روزهای ۱۷ تا ۲۱ مارس ۲۰۱۹ حوضه آبریز گرگانرود در استان گلستان که باعث ایجاد سیل و خسارات سنگین در این استان گردید، پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه تحقیق، حوضه آبریز گرگانرود می‌باشد که بیشتر مساحت آن در استان گلستان واقع شده است. استان گلستان یکی از استان‌های شمالی کشور می‌باشد و در جنوبشرق دریاچه خزر

واقع شده است. گرگانرود یکی از رودخانه‌های شمال شرق ایران است. این رود از رشته کوه آلاداغ در بجنورد سرچشمه گرفته و پس از طی ۲۰۰ کیلومتر و گذشتن از ترکمن صحرا وارد دشت گرگان شده و در نزدیکی بندر ترکمن به دریای خزر می‌ریزد. در شکل ۱ موقعیت جغرافیای حوضه گرگانرود، شبکه آبراهه‌ها، سدهای واقع بر روی گرگانرود و شهرهای گنبد کاووس و آق قلا که تحت تأثیر سیل قرار داشتند، نشان داده شده است.

در این تحقیق به منظور شناسایی و تحلیل بارش سنگین رخ داده در استان گلستان در روزهای پایانی سال ۱۳۹۷ (ماه مارس ۲۰۱۹) که منجر به سیل شدید گردید، از چندین نوع داده استفاده شد (داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، داده‌های بازتحلیل شده NCEP/NCAR، محصولات ماهواره‌ای MODIS، محصولات بارشی GPM).

ابتدا با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در حوضه آبریز گرگانرود، زمان وقوع بارش سنگین شناسایی شد و سپس با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های مذکور و چندین ایستگاه خارج از حوضه، نقشه بارش تهیه گردید. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

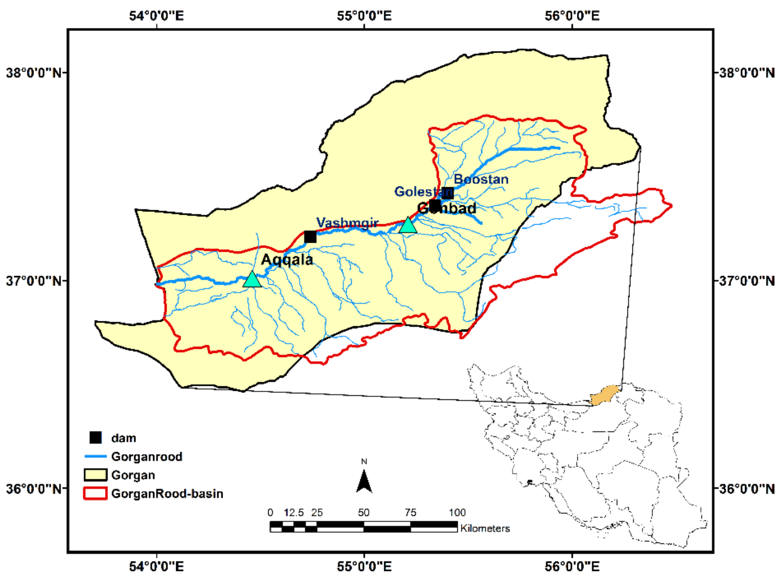
با استفاده از محصولات بارشی ماهواره GPM با عنوان IMERG که به صورت نیم ساعته استخراج شد و همچنین گزارشات سینوپ اصلی ایستگاه‌های هواشناسی که به صورت شش ساعته گزارش می‌شوند، شدت بارش مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر آن، با استفاده از نقشه توپوگرافی و شیب حوضه تهیه شده از لایه DEM منطقه، شرایط فیزیکی حوضه بررسی شد.

در ادامه با استفاده از داده های بازتحلیل شده پایگاه NCEP/NCAR (مرکز ملی پیش‌بینی محیطی-مرکز ملی پژوهش‌های جوی ایالات متحده) نقشه‌های سینوپتیکی شامل نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل تروپسفر میانی و زیرین، چرخندگی نسبی، امگا، سمت و سرعت باد، تابع همگرایی شار رطوبت، تابع جبهه‌زایی، رطوبت ویژه و نمودار هوف-مولر جهت بررسی شرایط سینوپتیکی-دینامیکی تروپسفر میانی و زیرین و همچنین شناسایی وضعیت رطوبتی و منابع تأمین آن، ترسیم و مورد تحلیل قرار گرفتند. سپس با استفاده از محصولات ماهواره MODIS-Aqua (تصاویر طیف مرئی، ضخامت نوری ابر و فشار قله ابر) شرایط ابرناکی و نوع ابرهای در زمان رخداد بارش سنگین بررسی شد.

نتایج و بحث

شناسایی توزیع زمانی و مکانی بارش‌ها

بارش منجربه سیل در ماه مارس ۲۰۱۹ در استان گلستان از هفده مارس آغاز شد و تا بیست و یکم مارس ادامه داشت. به منظور شناسایی زمان اوج بارش‌ها طی این چند روز، آمار بارش ایستگاه‌های هواشناسی واقع در حوضه گرگانرود بررسی شد. بارش ۲۴ ساعته چند ایستگاه منتخب از هفدهم تا بیست و یکم مارس در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان گلستان و حوضه آبریز گرگانرود

Figure 1- Geographical location of Golestan province and Gorganrood watershed

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در تحقیق

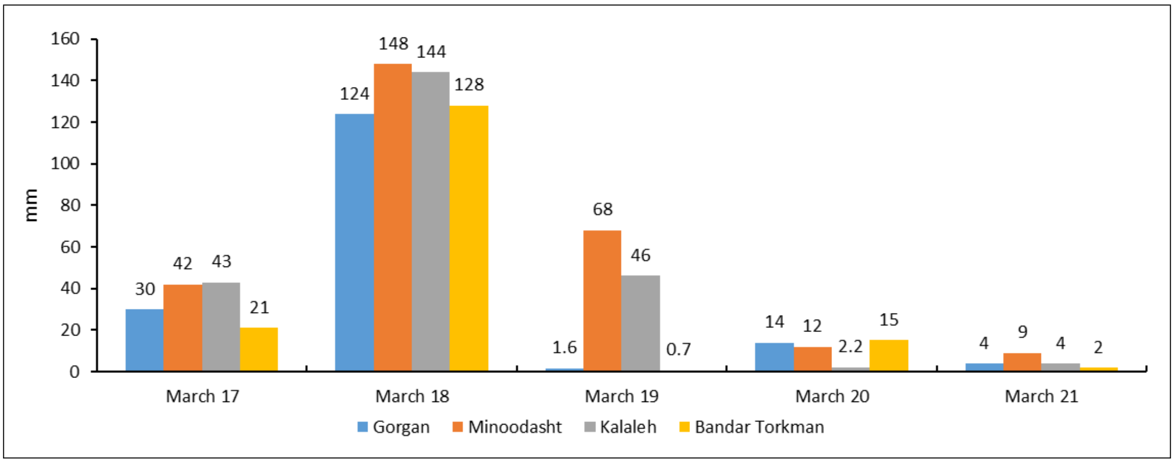
Table 2- Meteorological stations used in the research

نام ایستگاه Station Name	عرض جغرافیایی Lat	طول جغرافیایی Lon	ارتفاع Elevation
بندرترکمن BandarTorkman	36.9	54.07	-20
پارک ملی گلستان Park Meli Golestan	37.22	55.56	735
علی آباد Aliabad	36.9	54.88	184
قپان Ghapan	37.64	55.71	314
کلاله Kalaleh	37.39	55.46	128
گرگان Gorgan	36.91	54.41	0
گنبد کاووس GonbadKavoos	37.27	55.21	37
مینودشت Minoodasht	37.37	55.63	223
هاشم آباد Hashemabad	36.85	54.30	13
کارکنده Karkandeh	36.76	54.30	110
کردکوی Kordkooy	36.82	54.11	3
رضوان Rezvan	37.11	55.80	1356
مراوه تپه* MaravehTappeh	37.80	55.94	460
بندر گز* BandarGaz	36.77	53.95	-14
اینچه برون* Incheborun	37.45	54.72	7
دامغان* Damghan	36.15	54.32	1155
جاجرم* Jajrood	36.95	56.33	984
میامی* Meyami	36.41	55.63	1081
شاهرود* Shahrood	36.38	54.93	1325

*ایستگاه‌هایی که خارج حوضه آبریز گرگانرود قرار دارند و برای درونیابی بارش استفاده شدند

*The stations that are outside the Gorganrood catchment and were used to interpolate precipitation

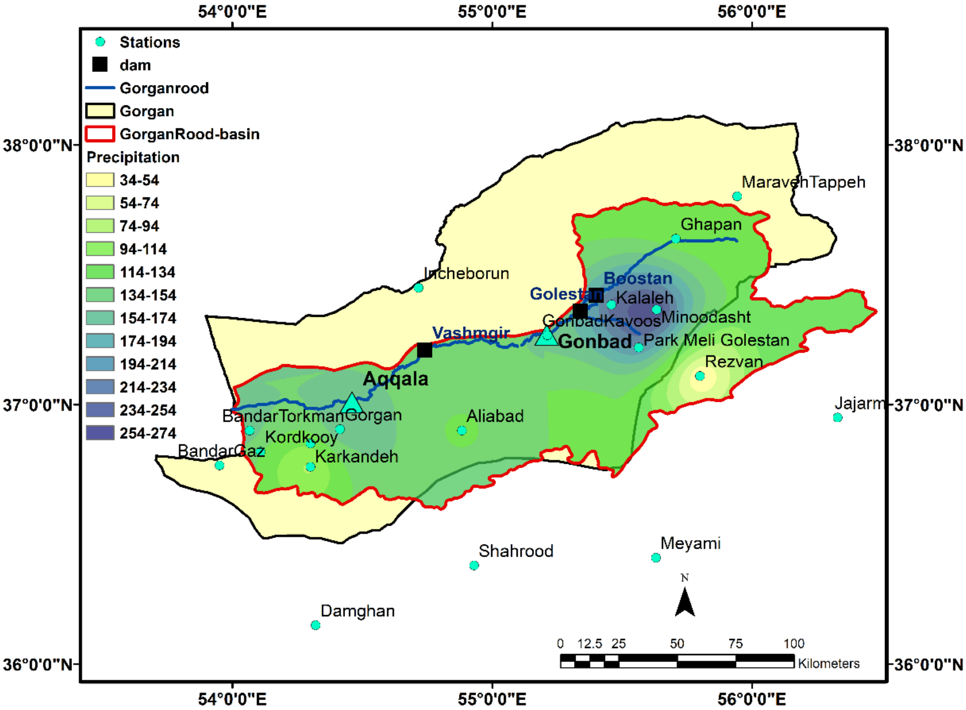
با توجه به نمودار مشـــاهده می‌شـــود بیشـــترین مقدار بارش در روزهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مارس به ثبت رسیده است؛ بطوریکه در روز ۱۸ مارس بارش‌های بالای ۱۲۰ میلیمتر طی ۲۴ ساعت مشاهده می‌شود. البته لازم به ذکر اســـت که بارش ۲۴ ســـاعته برای هر روز از مجموع بارش گزارش شده سینوپ‌های اصلی ایستگاه‌های هواشناسی از ساعت ۰۰ تا ۲۴ همان روز محاسبه شده است. از این رو گزارشات ۶ ساعته سینوپ‌های اصلی بررسی شد و نتایج نشان داد بیشترین مقدار بارش در روز هجدهم مارس به وقوع پیوسته است (جدول ۳). بنابراین نقشـــه‌های ســـینوپتیک عمدتاً برای زمان اوج بارش یعنی روز هجدهم مارس ترسیم گردیدند.



شکل ۲- نمودار بارش ٢٤ ساعته چند ایستگاه منتخب حوضه گرگانرود از ۱۷ تا ۲۱ مارس ۲۰۱۹

Figure 2- 24-hour precipitation chart of selected stations of Gorganrood basin

پس از شـناسـایی زمان وقوع بارش سـنگین، اقدام به شـناسـایی توزیع مکانی بارش ها گردید. بدین منظور مجموع بارش هفدهم تا بیست و یکم مارس در حوضه گرگانرود ترسیم گردید (شکل ۳). نقشه مجموع بارش نشان می‌دهد طی این چند روز در اکثر مناطق حوضه، بارش سنگین به وقوع پیوسته است؛ بطوری‌که در اکثر مناطق حوضه میزان بارش بالای ۹۰ میلی‌متر اسـت. همچنین نقشـه مذکور نشـان می‌دهد بیشترین مقدار بارش که بیش از ۲۵۰ میلی‌متر است در ناحیه ایستگاه‌های کلاله، مینودشت و پارک ملی گلستان رخ داده است.



شکل ۳- نقشه مجموع بارش طی روزهای ۱۷ تا ۲۱ مارس ۲۰۱۹ در حوضه گرگانرود

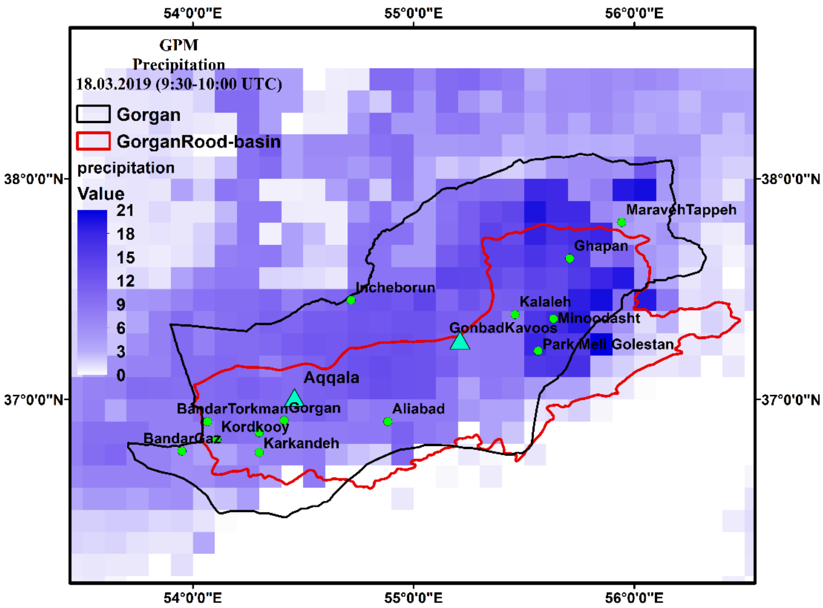
Figure 3- Total rainfall during March 17-21, 2019 in Gorganrood basin

در وقوع سیلاب شدت بارش یعنی مقدار بارش نسبت به مدت زمان بارش از عوامل مهم به شمار می‌رود. برر سی بارش ۲۴ ساعته نشان داد که طی روزهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مارس بارش‌های سنگینی به وقوع پیو سته ا ست. اما جهت برر سی دقیق‌تر زمان اوج بارش و شدت بارش در فوا صل زمانی کمتر از ۲۴ ساعت، از گزار شات سینوپ‌های اصلی هواشناسی میزان بارش ۶ ساعته استخراج گردید که مقدار بارش ۶ ساعته برای زمان اوج بارش در جدول ۳ ارائه شده‌اند. بررسی میزان بارش‌های ۶ ساعته نشان می‌دهد در روز هجدهم و بویژه در ساعت‌های ۰۶ تا ۱۲ و ۱۲ تا ۱۸ بارش‌های بسیار شدیدی رخ داده است؛ مثلاً در برخی ایستگاه‌ها بارش‌های ۴۹، ۶۹، ۸۳ و ۸۷ میلیمتر طی ۶ ساعت مشاهده می‌شوند که در گزارشات هواشناسی این میزان بارش جزء بارش‌های بسیار شدید طبقه‌بندی می‌شود.

جدول ۳- داده‌های بارش ٦ ساعته چهار ایستگاه منتخب حوضه گرگانرود استخراج شده از گزارشات هواشناسی برای زمان اوج بارش

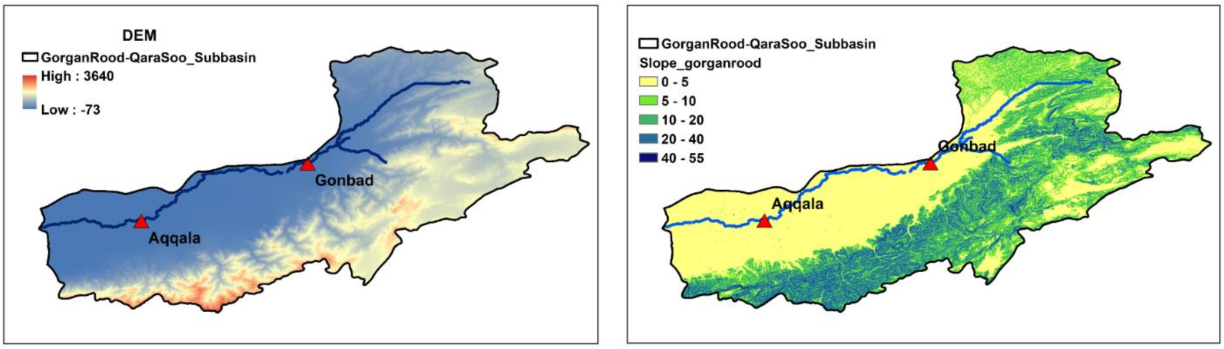
Table 3- 6-hour rainfall data of four selected stations of Gorganrood basin extracted from meteorological reports for peak rainfall time

تاریخ Date	ساعت به وقت جهانی UTC	گرگان Gorgan	مینودشت Minoodasht	کلاله Kalaleh	بندر ترکمن BandrTorkman
۱۷ مارس March 17	00-06	0	0	0	0
	06-12	0	0	0	0
	12-18	3	5	1	0.7
	18-00	27	37	42	20
۱۸ مارس March 18	00-06	28	8	7	69
	06-12	49	87	83	36
	12-18	43	30	34	20
	18-00	4	23	20	3
۱۹ مارس March 19	00-06	1	30	22	0.4
	06-12	0.4	30	19	0.3
	12-18	0.2	7	0.8	0
	18-00	0	0.7	4	0



شکل ٤- تصویر محصول ماهواره GPM برای بارش از ساعت ۹:۳۰ تا ۱۰:۰۰ (به وقت جهانی) روز ۱۸ مارس ۲۰۱۹

Figure 4- GPM satellite product image for rainfall from 9:30 to 10:00 (UTC) on March 18, 2019



الف ب

شکل ۵- نقشه طبقه‌بندی شیب (الف) و توپوگرافی (ب) حوضه گرگانرود

Figure 5- Slope classification (a) and topography (b) of Gorganrood basin

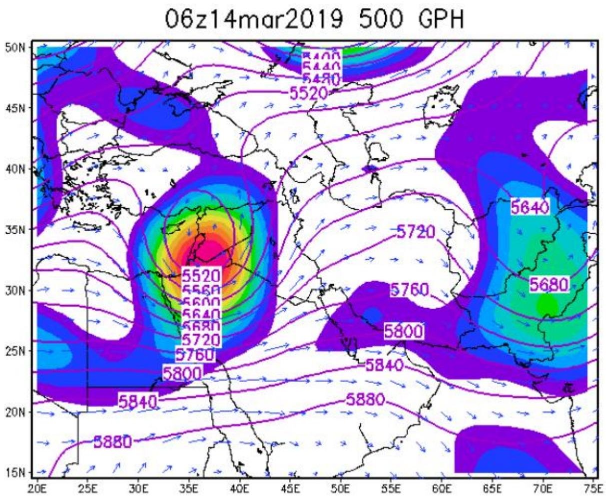
علاوه بر بارش ۶ ساعته، برای بررسی شدت بارش در مقیاس زمانی کمتر از ۶ ساعت از محصولات بارش نیم ساعته ماهواره GPM استفاده گردید. در شکل ۴ یک نمونه از تصاویر بارش نیم ساعته در بازه زمانی ۹:۳۰ تا ۱۰:۰۰ (به وقت جهانی) روز هجدهم مارس ارائه شده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد در حوضه گرگانرود طی نیم ساعت بارش قابل توجهی باریده است بویژه در ناحیه ایستگاه‌های کلاله، مینودشت و پارک ملی گلستان که تا ۲۰ میلیمتر نیز می‌رسد و این میزان جزء بارش‌های بسیار شدید حساب می‌شود.

از عوامل دیگر در وقوع سیلاب توپوگرافی و شیب حوضه می‌باشد. بررسی نقشه توپوگرافی منطقه نشان می‌دهد رودخانه گرگانرود در دشتی با ارتفاع پایین که در کنار کوه‌های مرتفع قرار گرفته، جریان دارد؛ بطوریکه اختلاف ارتفاع دشت با قله کوه‌ها به بیش از ۳۰۰۰ متر می‌رسد (شکل ۵ الف). از سوی دیگر نقشه شیب نشان می‌دهد حوضه گرگانرود بگونه‌ای است که کوه‌های مرتفع با شیب زیاد در حاشیه دشتی پست با شیب بسیار کم (کمتر از ۵ درصد) واقع شده‌اند (شکل ۵ ب). از این رو پتانسیل وقوع سیلاب در این حوضه زیاد است و همانطور که در زمان وقوع سیلاب مورد مطالعه رخ داد، بدلیل شیب اندک مسیر گرگانرود و قرارگیری شهرهای مختلف در حاشیه آن (ازجمله گنبد کاووس و آق قلا) در صورت وقوع بارش سنگین و سیلاب، آبگرفتگی ماندگاری زیادی در این منطقه خواهد داشت.

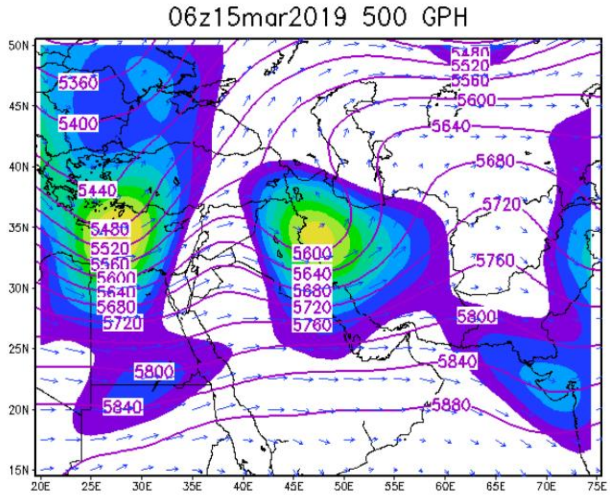
وضعیت سینوپتیکی-دینامیکی تروپسفر میانی

با هدف شناسایی منشأ سیستم‌های سینوپتیکی بارش‌زا و نحوه تأثیرگذاری آنها بر منطقه مورد مطالعه که منجربه سیل گردید، وضعیت سینوپتیکی تروپسفر میانی از چند روز قبل از شروع بارش‌ها تا زمان خاتمه آن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به همراه چرخندگی نسبی از روز چهاردهم تا بیست و دوم مارس ترسیم گردید (شکل ۶).

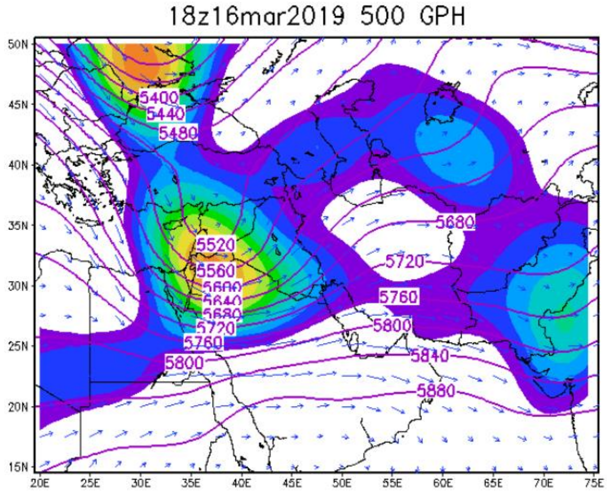
در روز ۱۴ مارس (شکل ۶ الف)، ترافی نه چندان عمیق با مرکز بسته در شرق مدیترانه شکل گرفته که در روز پانزدهم (شکل ۶ ب) با حرکت شرق سو از ناحیه غربی وارد ایران شده است. در همین روز، تراف دیگری به دنبال تراف قبلی بر روی مدیترانه در حال شکل‌گیری می‌باشد و آرایش منحنی‌های هم‌ارتفاع بیان‌گر تشکیل یک موج راسبی با مقیاس بزرگ بر روی شرق اروپا و غرب خاورمیانه می‌باشد. به عبارت دیگر در روز پانزدهم، موج راسبی دارای دو تراف است که یکی بر روی غرب ابران و دیگری بر روی غرب مدیترانه قرار دارند. در این روز تراف اول با ایجاد چرخندگی مثبت منجربه ناپایداری و بارش‌های پراکنده در حوضه آبریز گرگانرود شده است. در روز ۱۶ مارس (شکل ۶ پ) همزمان با حرکت شرق سوی موج راسبی، تراف واقع بر روی غرب ایران ضمن یک حرکت شمال شرق سو تضعیف شده و از مرزهای شمال شرقی کشور خارج می شود، اما تراف واقع بر روی شرق مدیترانه با گسترش نصف‌النهاری موج راسبی عمیق‌تر شده و با حرکت به سمت شرق در بستر موج راسبی در روز هفدهم مارس (شکل ۶ ت) تمام سطح کشور را تحت سیطره خود درآورده است، بطوریکه در اواخر روز هفدهم منطقه مورد مطالعه در شمال‌شرق کشور تحت نفوذ آن قرار گرفته است. ناحیه چرخندگی مثبت در سراسر محور تراف ایجاد شده و مرکز بیشینه آن در مرکز تراف قرار دارد و در حال نزدیک شدن به منطقه مورد مطالعه می‌باشد. طبق داده‌های بارش شش ساعته بارندگی‌ها در استان گلستان از حوالی ساعت ۱۸ روز هفدهم مارس همزمان با ایجاد چرخندگی مثبت در منطقه آغاز شده است. در روز هجدهم مارس (شکل ۶ ث) مرکز تراف با حرکت شمال شرقی از مرکز ایران به سمت شمال شرق کشور انتقال یافته است. اکنون محور تراف حالت شمال‌غربی-جنوب‌شرقی دارد و با ریزش هوای سرد عرض‌های شمالی به عرض‌های جنب حاره‌ای، شکل‌گیری پدیده بندال و یک سردچال (کم‌ارتفاع بریده) با کنتور بسته داخلی ۵۵۲۰ ژئوپتانسیل‌متر در منتهی الیه جنوب شرقی دریای خزر را موجب گشته است.


06z14mar2019 500 GPH

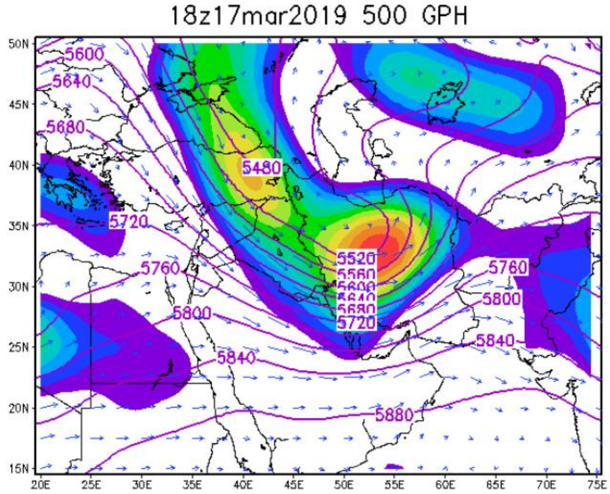
الف


06z15mar2019 500 GPH

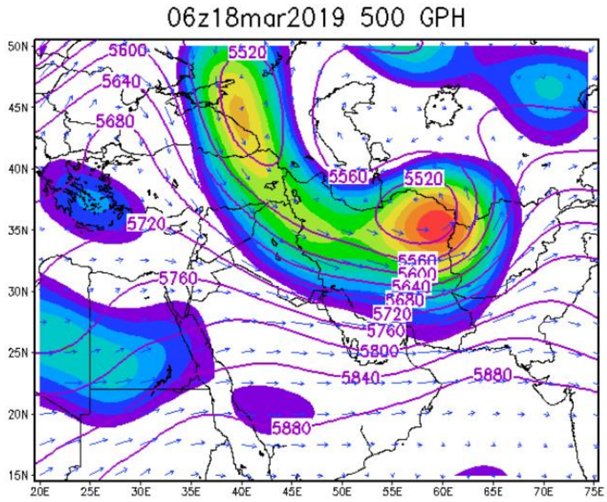
ب


18z16mar2019 500 GPH

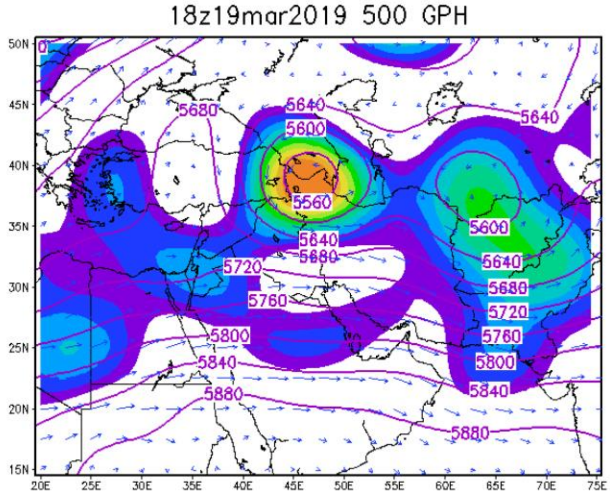
پ


18z17mar2019 500 GPH

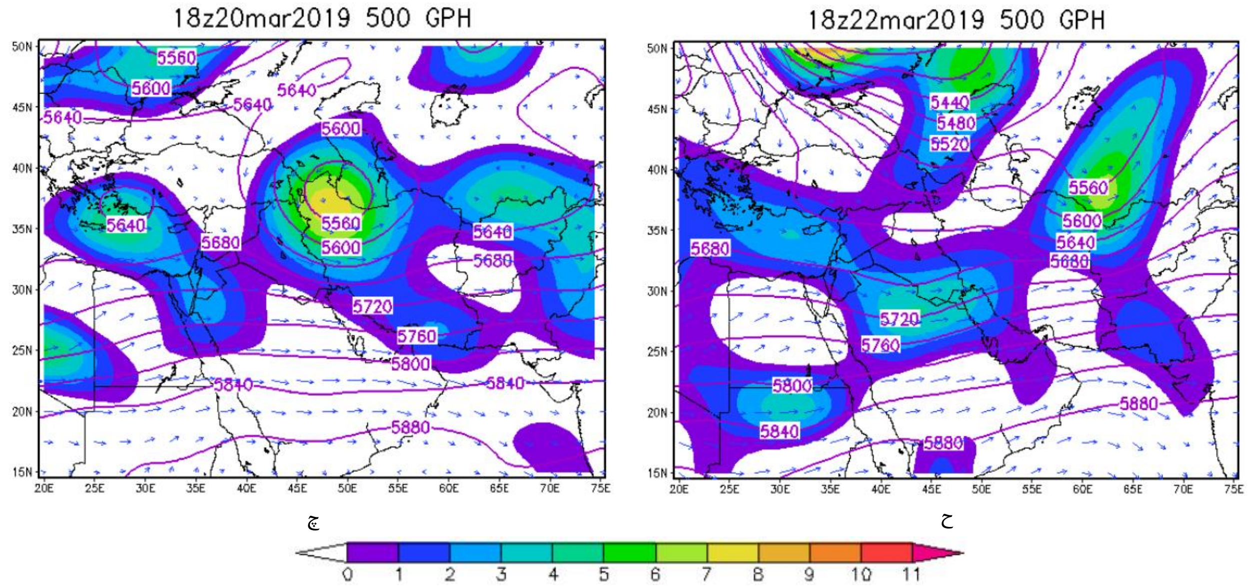
ت


06z18mar2019 500 GPH

ث


18z19mar2019 500 GPH

ج



شکل ٦- وضعیت سینوپتیکی- دینامیکی تروپسفر میانی از ١٤ الی ٢١ مارس ۲۰۱۹: ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برحسب ژئوپتانسیل متر (خطوط بنفش رنگ با فاصله ٤٠ ژئوپتانسیل متر)، بردارهای باد و چرخندگی نسبی (طیف رنگی)

Figure 6- Synoptic-dynamic state of the middle troposphere from March 14 to 21, 2019: 500 hPa level height in geopotential meters (purple lines with a distance of 40 gpm), wind vectors and relative virticity (color spectrum)

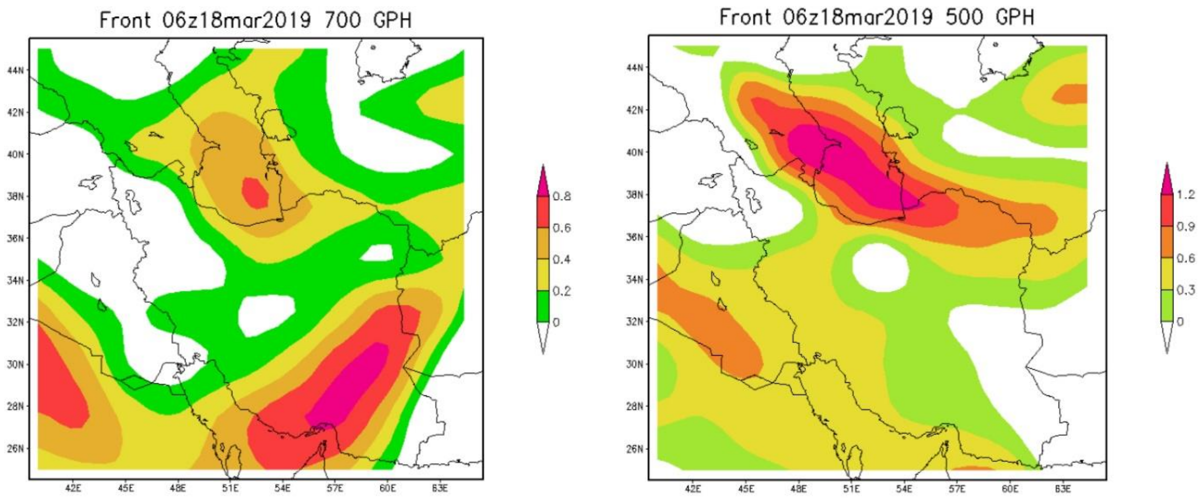
همچنین یک کم‌ارتفاع بسته دیگری در غرب دریای خزر در ناحیه محور تراف تشـکیل یافته اسـت. قابل ذکر اسـت که بیشـترین مقدار بارش در روز ۱۸ مارس در زمان استیلای مرکز تراف (کم‌ارتفاع بریده) و چرخندگی مثبت بر فراز استان گلستان به وقوع پیوسته است. در روز ۱۹ مارس (شکل ۶ ج) موج راسبی و تراف حاصل از آن تضعیف شده و کم‌ارتفاع بریده مرکز آن از مرزهای شمال‌شرقی در حال خارج شدن ا ست. از سوی دیگر کم‌ارتفاع بریده واقع در غرب خزر در بستر موج راسبی حرکت شرقی و جنوب‌شرقی دارد و در روزهای ۲۰ و ۲۱ مارس (شکل ۶ چ) در منطقه مورد مطالعه فعالیت دا شته و در روز ۲۲ مارس (شکل ۶ ح) ضمن تضعیف از منطقه خارج شده است.

شـرایط سـینوپتیکی تروپسـفر میانی نشـان داد در زمان رخداد بارش‌ها ترافی عمیق بر روی منطقه مستقر بوده و سبب ریزش هوای سرد به منطقه مورد مطالعه شده ا ست که این مسئله می‌تواند منجربه تشکیل جبهه‌های هوا در منطقه گردد. از این رو، پتانسیل ایجاد جبهه در منطقه با ا ستفاده از تابع جبهه‌زایی مورد برر سی قرار گرفت (شکل ۷). تابع جبهه‌زایی براساس افزایش گرادیان افقی دما نا شی از تغییرات سـمت و سـرعت باد محاسـبه می‌شـود و مقادیر مثبت آن مکان‌های مسـتعد ایجاد جبهه را نشـان می‌دهند. تابع جبهه‌زایی برای زمان اوج بارش یعنی ۱۸ مارس در ترازهای ۵۰۰ و ۷۰۰ هکتوپاسـکالی نشـان می‌دهد شرایط جبهه‌زایی در منطقه مورد مطالعه به ویژه در مسیر ورود هوای سرد بر روی جنوب دریای خزر، فراهم است.

وضعیت سینوپتیکی-دینامیکی تروپسفر زیرین

تراز فشاری ۸۵۰ هکتوپاسکال برای بررسی وضعیت سینوپتیکی- دینامیکی تروپسـفر زیرین انتخاب گردید. در این تراز خطوط هم‌ارتفاع توأم با متغیر امگا، خطوط هم‌دما و بردارهای باد چند روز قبل از بارندگی تا اتمام بارش‌ها مورد برر سی قرار گرفت و به دلیل حجم زیاد نقشه‌ها، مهم‌ترین نقشه‌ها در روزهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مارس در شکل ۷ ارائه شـد. امگا بیانگر حرکات عمودی جو بر حسـب پاسـکال بر ثانیه است که مقادی منفی آن سرعت قائم بالاسوی هوا را نشان می‌دهد.

قبل از شـروع بارش در روز ۱۷ مارس (شـکل ۸ الف)، با ورود زبانه‌های کم‌ارتفاع از سمت شمال‌غرب کشور در بستر موج را سبی، یک مرکز کم‌ارتفاع در غرب کشور با کنتور بسته ۱۴۰۰ ژئوپتانسیل‌متر در حال شکل‌گیری است. خطوط هم‌دما و بردارهای باد بیانگر فرارفت هوای سرد عرض‌های شمالی به سوی عرض‌های جنوبی در منطقه غرب کشـور می‌باشـند. مرکز کم‌ارتفاع طی سـاعات بعدی، ضـمن گسترش با حرکت شرق سو نواحی شمالی کشور را در برگرفته ا ست (شکل ۸ ب) و منجربه ایجاد چرخش سیکلونی و ایجاد شرایط صعود هوا گ شته ا ست. ا ستیلای امگای منفی بر شمال ک شور و قرارگیری مرکز بیشـیه آن در ناحیه مرکز کم‌ارتفاع گفته قبلی را مورد تأیید قرار می‌دهد. در روز ۱۸ مارس (شـکل ۸ پ) در زمان اوج بارش‌ها، مرکز کم‌ارتفاع با کنتورهای بسـته (کنتور مرکزی ۱۳۶۰ ژئوپتانسـیل‌متر) همراه با مرکز بیشـینه امگای منفی بر فراز منطقه مورد مطالعه چیره گشـته اسـت. بردارهای باد در اطراف کم‌ارتفاع چرخش سـیکلونی را نشان می‌دهند.



شکل ۷- تابع جبهه‌زایی در ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکالی

Figure 7- Frontogenesis Function at 700 to 500 hpa levels

تمامی این شرایط حاکی از صعود شدید هوا در ترازهای زیرین جو می‌باشد. در روز ۱۹ مارس (شکل ۸ ت) مرکز کم‌ارتفاع از منطقه مورد مطالع خارج شده است و زبانه‌ای از آن با کنتور ۱۴۸۰ ژئوپتانسیل‌متر بر روی منطقه فعال است، همچنین از شدت امگای منفی کاسته شده است.

بررسی منابع رطوبت

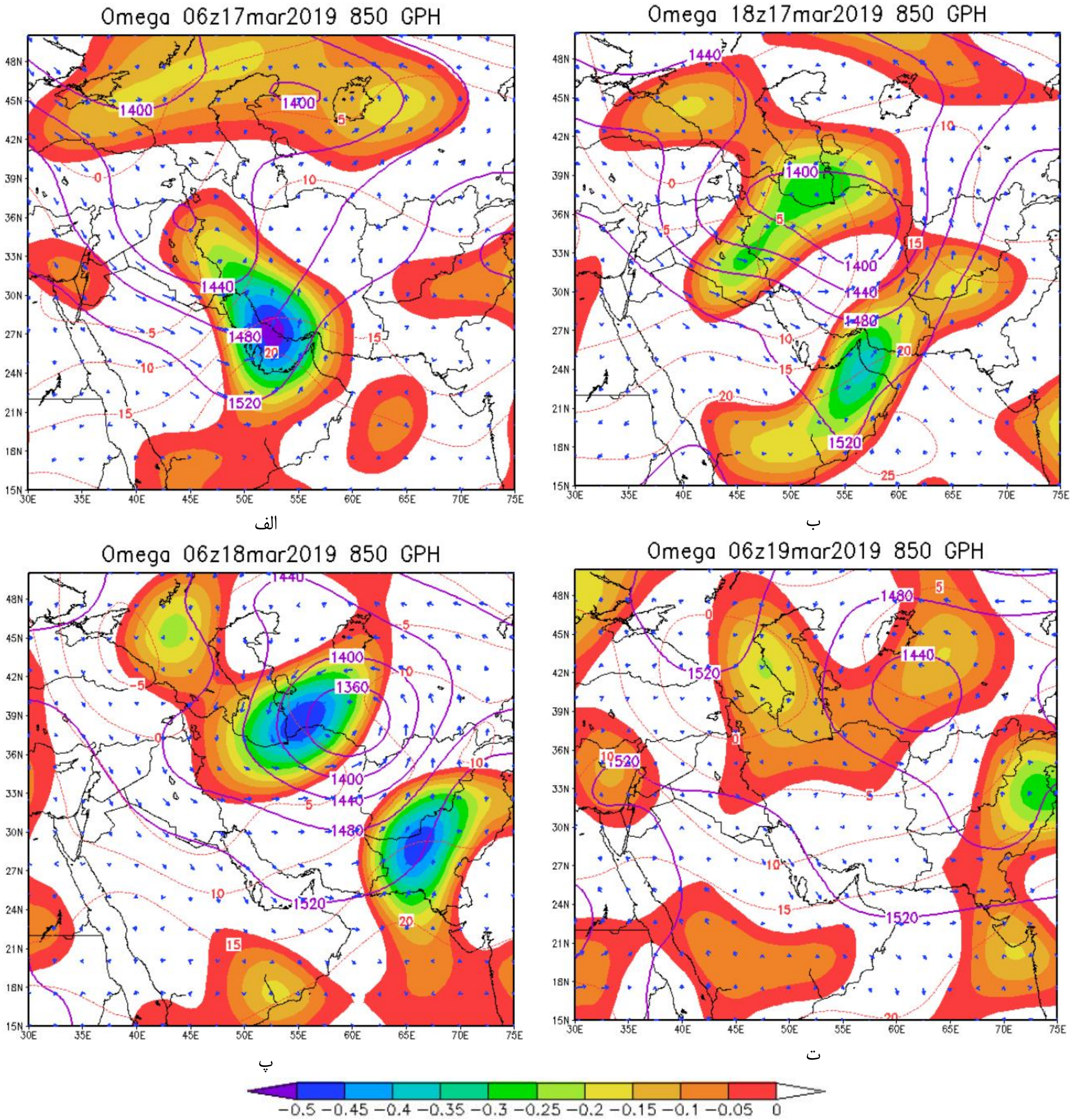
در بخش قبلی یکی از عوامل اصلی بارش یعنی عامل صعود هوا مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. عامل دیگر در وقوع بارش، رطوبت می‌باشد. برای بررسی شرایط رطوبتی در زمان رخداد بارش سنگین و شناسایی منابع رطوبت و مسیرهای انتقال آن به منطقه مورد مطالعه از نقشه‌های رطوبت ویژه و همگرایی شار رطوبت استفاده شد. رطوبت ویژه وزن بخار آب موجود در هر کیلوگرم هوای مرطوب است و همگرایی شار رطوبت میزان همرفت افقی و همگرایی رطوبت را برحسب گرم بر کیلوگرم در ثانیه بیان می‌کند.

در شکل ۹ متوسط رطوبت ویژه به همراه متوسط جریان هوا برای ترازهای ۱۰۰۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکالی، قبل از شروع بارش تا زمان رخداد بارش سنگین ترسیم شده‌اند. در روز ۱۷ مارس ساعت ۱۲ (شکل ۹ الف) چند ساعت قبل از شروع بارش یک منطقه بیشینه رطوبت در جنوب ایران بر روی تنگه هرمز تا مناطق مرکزی شکل گرفته و جریانات شمال‌سو از منطقه مذکور تا منطقه مورد مطالعه برقرار است. ساعاتی بعد در ساعت ۱۸ (شکل ۹ ب) منطقه بیشینه رطوبت تحت تأثیر جریان هوا اندکی به سمت شرق جابجا شده و زبانه آن تا مناطق شمال شرق گسترش یافته است. جریان هوا در مناطق شمالی کشور چرخش سیکلونی و حالت همگرایی پیدا کرده است. در ساعت ۰۰ روز ۱۸ مارس (شکل ۹ پ) همچنان جریانات شمال‌سو از عرض‌های جنوبی تا شمال‌شرق ایران جریان دارند و در این منطقه چرخش سیکلونی قوی برقرار است و زبانه مرکز بیشینه رطوبت ویژه منطقه مورد مطالعه را در برگرفته است که حاکی از ورود رطوبت به این منطقه می‌باشد. در ساعت ۰۶ روز ۱۸ مارس (شکل ۹ ت) محور بیشینه رطوبت به تبعیت از جریان هوا حالت جنوبغربی-شمال‌شرقی دارد و از منطقه مورد مطالعه فاصله گرفته است و از سواحل غربی اقیانوس هند تا مناطق شمالی پاکستان و افغانستان کشیده شده است. با این وجود جریانات سیکلونی رطوبت مناطق مذکور و سایر مناطق ازجمله دریای خزر را به مناطق شمال‌شرق ایران منتقل کرده و یک مرکز بیشینه رطوبت در آن ایجاد کرده‌اند.

برای شناسایی دقیق‌تر منابع رطوبتی بارش‌های سنگین در حوضه آبریز گرگانرود، متوسط همگرایی شار رطوبت از تراز ۱۰۰۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال در زمان‌های مشابه شکل۹ به همراه بردارهای میدان باد ترسیم گردیدند (شکل ۱۰). مقادیر مثبت شار رطوبت در یک منطقه بیانگر فزونی رطوبت ورودی بر رطوبت خروجی و در نتیجه افزایش رطوبت در آن منطقه است و مقادیر منفی خروج رطوبت را نشان می‌دهند.

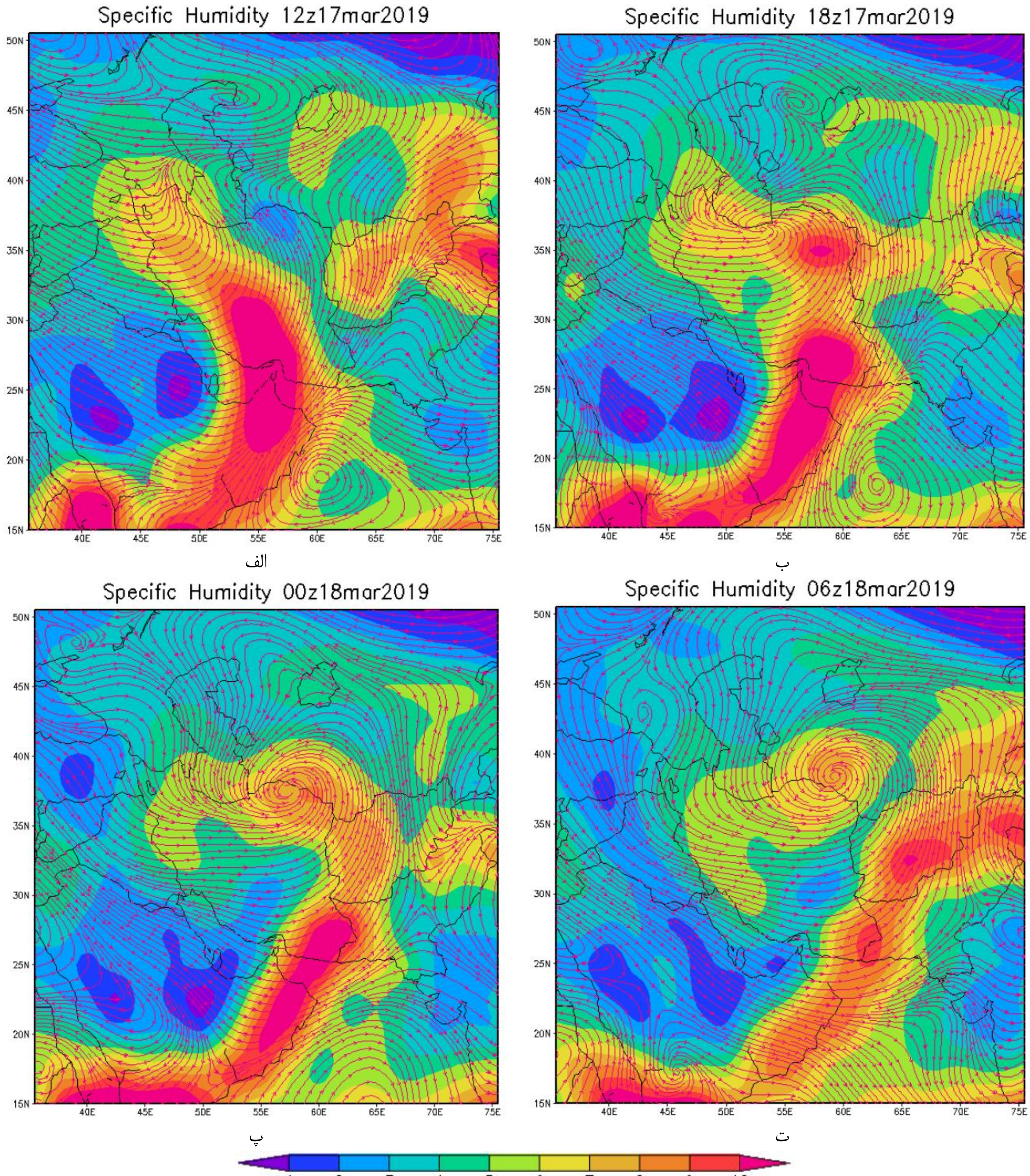
در ساعت ۱۲ روز ۱۷ مارس (شکل ۱۰ الف) مرکز بیشینه مثبت همگرایی شار رطوبت در مرکز ایران و مرکز بیشینه منفی بر روی خلیج فارس واقع شده‌اند و بردارهای باد مسیر انتقال رطوبت خلیج فارس به داخل ایران را نشان می‌دهند. چند ساعت بعد در ساعت ۱۸ جریانات با عبور از خلیج فارس و دریای عمان به سمت شمال‌شرق کشور در جریان هستند و مرکز بیشینه همگرایی شار رطوبت را به شمال شرق کشور منتقل می‌کنند. در ساعات ۰۰ و ۰۶ هجده مارس

(شکل ۱۰ پ و ت) مرکز بیشینه منفی بر روی تنگه هرمز و دریای عمان قرار دارد و به سمت شمال شرق کشیده شده است. از سوی دیگر مرکز بیشینه مثبت به منتهی الیه شمال شرق کشور انتقال یافته و زبانه‌های آن منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته‌اند. طی این ساعات حرکت سیکلونی جریان هوا و همگرایی آن در شمال‌شرق ایران رطوبت را از خلیج فارس، دریای عمان، بخش غربی اقیانوس هند، دریای خزر و مناطق شمالی پاکستان و افغانستان به منطقه مورد مطالعه انتقال می‌دهد. مرکز بیشینه منفی همگرایی رطوبت در ساعات اوج بارش نشان می‌دهد منشأ اصلی رطوبت بارش‌ها دریاهای جنوبی ایران می‌باشند.



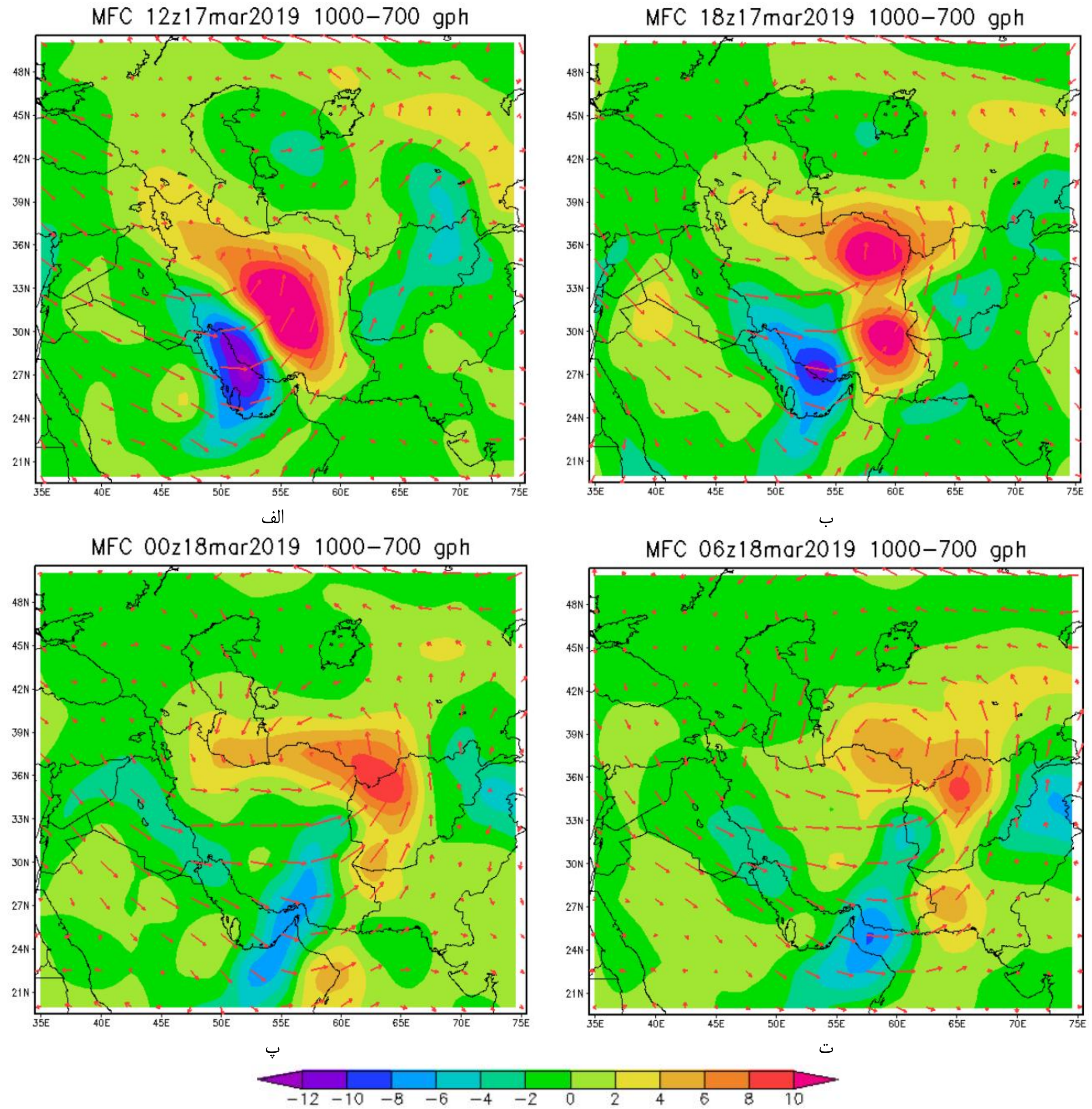
شکل ۸- وضعیت سینوپتیکی-دینامیکی تروپسفر پایینی: ارتفاع ژئوپتاسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (خطوط بنفش رنگ)، امگا برحسب پاسکال بر ثانیه (طیف رنگی)، خطوط همدما (قرمز) و بردار باد برای روزهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مارس ۲۰۱۹

Figure 8- Synoptic-dynamic state of the lower troposphere: 850 hPa level in geopotential meters (purple lines), omega in pas/s (color spectrum), isothermal lines (red) and wind vector for March 17, 18 and 19, 2019



شکل ۹- متوسط رطوبت ویژه (برحسب گرم بر کیلوگرم) و جریان هوا در ترازهای ۱۰۰۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکالی برای روزهای ۱۷ و ۱۸ مارس ۲۰۱۹

Figure 9- Average specific humidity (g/kg) and air flow in the levels of 1000 to 700 hectopascals for March 17 and 18, 2019



شکل ۱۰- همگرایی شار رطوبت بر حسب گرم بر کیلوگرم در ثانیه (طیف رنگی) و بردارهای باد برای روزهای ۱۷ و ۱۸ مارس ۲۰۱۹

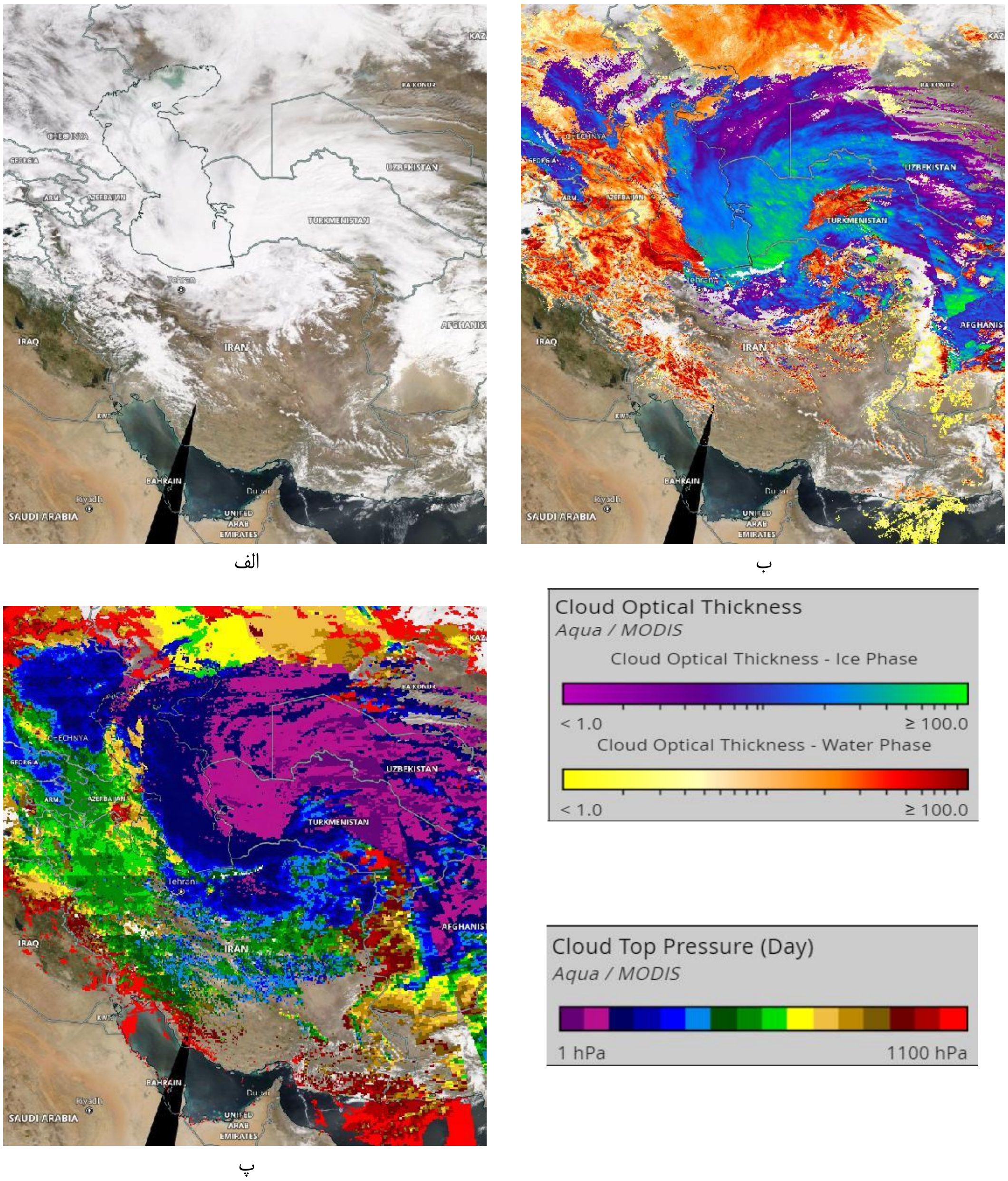
Figure 10- Moisture flux convergence in g/kg.s (color spectrum) and wind vectors for March 17 and 18, 2019

بررسی ویژگی‌های ابرها و پروفایل قائم جو در زمان رخداد بارش سنگین

برای بررسی ابرناکی و ویژگی‌های ابرها از محصولات ماهواره MODIS-Aqua استفاده شد. میزان ابرناکی در روز ۱۸ مارس (شکل ۱۱ الف) نشان می‌دهد ابرها کل منطقه فعالیت سیکلون را در برگرفته‌اند و آرایش ابرها بیانگر حرکت سیکلونی موجود در منطقه می‌باشد. برای تشخیص انواع ابرها از ضخامت نوری ابر[1] و فشار قله ابر[2] براساس طبقه‌بندی انواع ابر در پروژه ISCCP[3] استفاده شد. ضخامت نوری ابر تضعیف نور هنگام عبور از عمق ابر به طول واحد در اثر جذب و پراکنش به وسیله ذرات آب و بخار است و در واقع

1 . Cloud Optical Thickness
2- Cloud Top Pressure
3- International Satellite cloud climatology project

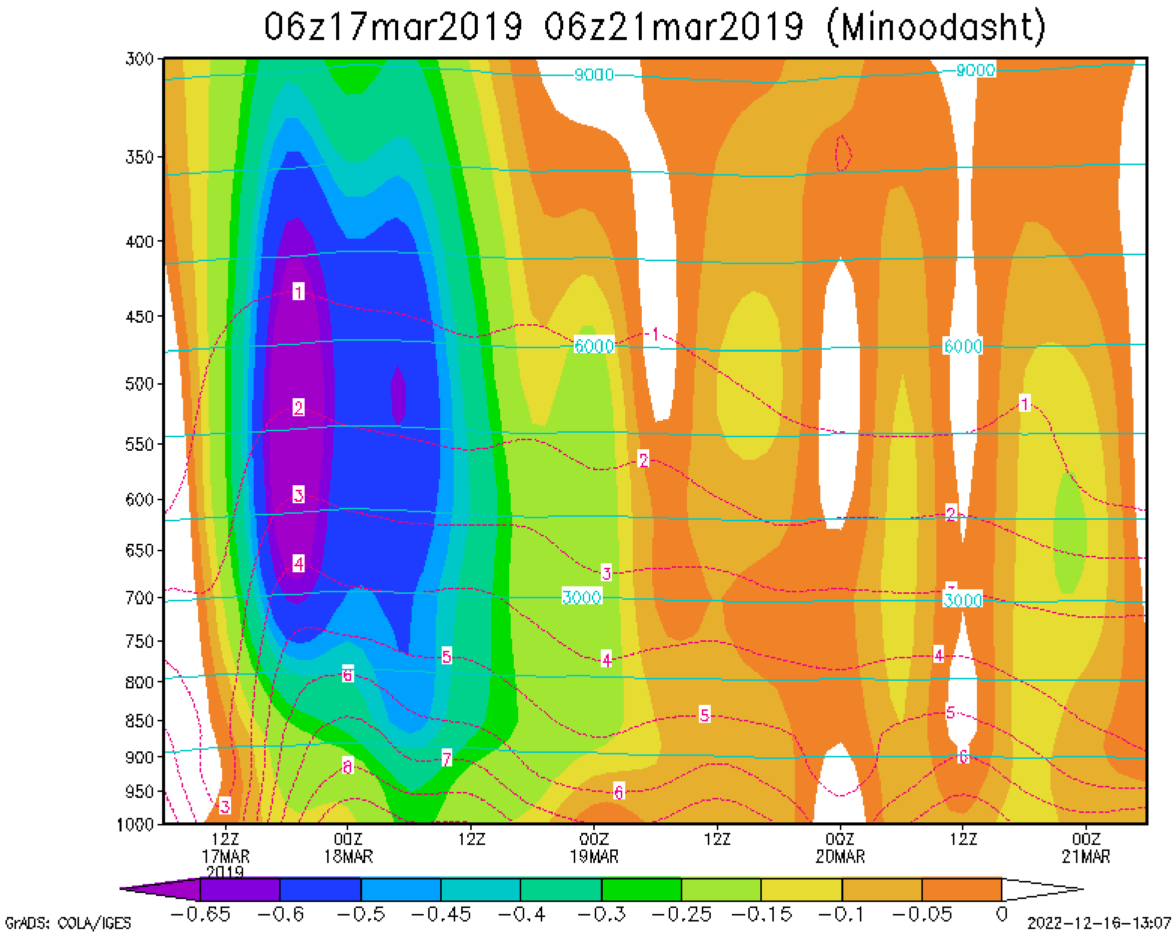
ضخامت ابر و چگالی آب موجود در آن را نشان می‌دهد. فشار قله ابر میزان فشار بالاترین قسمت ابر را بر حسب هکتوپاسکال بیان می‌کند. طیف رنگی در شکل (۱۱ب) ضخامت نوری ابر و در شکل (۱۱پ) فشار قله ابر را نشان می‌دهد. بر این اساس، ضخامت نوری ابر در منطقه مورد مطالعه بسیار بالاست و در برخی مناطق آن به بالای ۱۰۰ واحد نیز رسیده است، از سوی دیگر فشار قله ابر مقادیر بسیار پایینی (حدود ۳۰۰ هکتوپاسکال) در این منطقه دارا می‌باشد. بنابراین طبق طبقه‌بندی ISCCP، ابرهای موجود در منطقه مورد مطالعه عمدتاً از نوع همرفتی عمیق (کومولونیمبوس) هستند.



شکل ۱۱- محصولات ماهواره MODIS(Aqua) برای روز ۱۸ مارس ۲۰۱۹، الف: ابرناکی، ب: ضخامت نوری ابر، پ: فشار قله ابر (بر حسب هکتوپاسکال)

Figure 11- MODIS(Aqua) satellite products for March 18, 2019, A: Cloud cover, B: Cloud optical thickness, C: Cloud top pressure (in hectopascals)

در نهایت، شرایط ناپایداری در سطوح مختلف جو طی روزهای رخداد بارش بررسی شد. بدین منظور، پروفایل قائم جو از ساعت ۰۶ (UTC) ۱۷ مارس تا ساعت ۰۶ (UTC) ۲۱ مارس که به نمودار هوف–مولر معروف است در موقعیت ایستگاه مینودشت (یکی از ایستگاه‌هایی که بارش زیادی در آن به ثبت رسیده بود)، ترسیم شد (شکل ۱۲). مهمترین پارامتر ترسیم شده در این نمودار امگا می‌باشد که شرایط ناپایداری جو یعنی حرکات عمودی هوا را نشان می‌دهد. در این شکل مقادیر منفی امگا که بیانگر صعود هوا می‌باشد بصورت طیف رنگی نمایش داده شده است. بررسی این نمودار نشان می‌دهد طی روزهای مورد مطالعه تقریباً در تمامی سطوح جو، شرایط ناپایدار برقرار بوده و جریانات صعودی وجود داشته است اما بیشترین شدت صعود هوا در زمانی است که بیشترین بارش‌ها رخ داده‌اند یعنی از ساعت ۱۸ روز هفده مارس تا ساعت ۱۸ روز هجده مارس. نکته قابل توجه در این شکل این است که در حوالی ساعت ۰۶ روز هجده مارس حرکات صعودی شدید از پایین‌ترین سطح شروع شده است که مطابق با زمانی است که بیشترین شدت بارش در آن رخ داده است و این موضوع نتایج نقشه‌ها و تحلیل‌های قبلی را تأیید می‌نماید. منحنی‌های رطوبت نیز نشان می‌دهند با ورود سیستم بارش‌زا به منطقه میزان رطوبت به ویژه در ترازهای پایین جو به شدت افزایش یافته است و با رخداد بارش‌ها به تدریج از میزان رطوبت کاسته می‌شود.



شکل ۱۲- نمودار هوف–مولر ایستگاه مینودشت از ساعت ۰٦ (UTC) ۱۷ مارس تا ساعت ۰٦ (UTC) ۲۱ مارس ۲۰۱۹، امگا (طیف رنگی)، ترازهای ارتفاع ژئوپتانسیل (خطوط سبز رنگ) و رطوبت ویژه برحسب گرم بر کیلوگرم (خط چین قرمز رنگ)

Figure 12- Hoff-Müller plot of Minodasht station from 06:00 (UTC) 17 March to 06:00 (UTC) 21 March 2019, omega (color spectrum), geopotential height levels (green lines) and specific humidity in grams/kg (red dashed line)

نتیجه‌گیری

سیل یکی از خسارت‌بارترین بلایای طبیعی است که عمده دلیل آن بارش‌های سنگین می‌باشد. در ماه مارس ۲۰۱۹ (هفدهم تا بیست و یکم) در حوضه آبریز گرگانرود وقوع بارش‌های سنگین منجربه ایجاد سیل در این حوضه گردید و به دلیل ماندگاری سیل و آبگرفتگی در شهرها و روستاها، خسارات مالی زیادی برجای گذاشت. لذا در این تحقیق عوامل ایجادکننده سیل مذکور ازجمله شرایط سینوپتیکی-دینامیکی بارش سنگین مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق حاضر در تحلیل عوامل وقوع سیل را می‌توان بطور خلاصه به شرح زیر بیان داشت:

- بررسی توپوگرافی و شیب حوضه گرگانرود مشخص کرد شرایط فیزیکی حوضه بگونه‌ای است که پتانسیل وقوع سیل در آن زیاد است.
- مقدار بارش در بازه‌های زمانی ۲۴، ۶ و نیم ساعته در منطقه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که بارش‌های رخ داده طی روزهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مارس بویژه در هجدهم مارس از نظر شدت جزء بارش‌های بسیار شدید هستند. به عنوان مثال بارش بالای ۸۰ میلی‌متر طی شش ساعت از ایستگاه‌های کلاله و مینودشت گزارش شده است. همچنین تصاویر ماهواره‌ای نشان داد طی نیم ساعت در برخی مناطق بارش بالای ۲۰ میلی‌متر رخ داده است.
- بررسی وضعیت تروپسفر میانی نشان داد تشکیل موج راسبی و گسترش نصف‌النهاری یکی از تراف‌های آن همراه با ایجاد چرخندگی مثبت که در روز هفده مارس منطقه مورد مطالعه را تحت سیطره درآورد از عوامل اصلی ایجاد جو باروکلینیک و صعود دینامیکی هوا می‌باشد.
- بررسی شرایط سینوپتیکی-دینامیکی ترازهای زیرین تروپسفر نشان داد در ترازهای پایین سیستم سینوپتیکی کم‌ارتفاع با کنتورهای بسته همزمان با حاکمیت تراف عمیق بر فراز منطقه، تشکیل و طی زمان‌های اوج بارش تقویت شده است و منجربه صعود شدید هوا گردیده است. به عبارت دیگر، قرارگیری منطقه مورد مطالعه در ناحیه شرقی تراف تراز میانی که شرایط چرخندگی مثبت و واگرایی شدید در آن حاکم است همزمان با تشکیل کم‌ارتفاع‌های بسته در ترازهای زیرین تا سطح زمین حاکی از تشکیل یک سیکلون عمیق بر روی منطقه مورد مطالعه می‌باشد که در زمان رخداد بارش سنگین منجر به ایجاد ناپایداری‌های شدید جوی و صعود دینامیکی هوا گردیده است. مقادیر امگای منفی که مرکز بیشینه آن در محل تشکیل سیکلون قرار دارد، مطالب فوق را تأیید می‌نماید.
- بررسی وضعیت رطوبت جو در منطقه مورد مطالعه و شناسایی منابع تأمین رطوبت با استفاده از نقشه‌های رطوبت ویژه، تابع همگرایی شار رطوبت و مسیرهای جریانات جوی انجام گرفت. نتایج نشان دادند رطوبت بارش‌های سنگین از دریاهای جنوبی ایران و دریای خزر تأمین شده است. تعقیب مسیرهای انتقال رطوبت قبل از شروع بارش و در زمان رخداد بارش نشان داد رطوبت زیادی از دریاهای جنوبی ایران به ویژه دریای عمان به شمال شرق ایران منتقل شده است و با وجود دریای خزر در مجاورت منطقه به عنوان یک منبع رطوبت، گردش سیکلونی حجم رطوبت بالایی را در منطقه تجمیع کرده است.
- بررسی متغیر امگا در پروفایل قائم جو با استفاده از نمودار هوف-مولر نشان داد طی زمان‌های رخداد بارش، حرکات صعودی در کلیه ترازهای تروپسفر حاکم بوده است به ویژه در زمان اوج بارش حرکات صعودی در ترازهای زیرین شدیدتر شده‌اند.
- شناسایی نوع ابرها با استفاده از محصولات MODIS نشان داد در زمان وقوع بارش‌های سنگین بخصوص در روز ۱۸ مارس ابرهای همرفتی عمیق همراه با چگالی بالایی از آب در منطقه تشکیل شده‌اند که تا ارتفاع زیادی گسترش یافته و ضخامت زیادی دارند.

در کل این نتیجه را می‌توان گرفت که تشکیل سیکلونی قوی در شمال شرق ایران در بستر ترافی عمیق و ورود رطوبت کافی از عوامل اصلی وقوع بارش سنگین بودند که این عوامل توأم با ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه شرایط وقوع سیلاب را فراهم کردند. عوامل شناسایی شده در رخداد بارش سنگین در تحقیق حاضر با برخی عوامل بارش‌های سنگین در مطالعات پیشین مشترک هستند که به بعضی از آن‌ها اشاره می شود: عامل چرخندگی مثبت و واگرایی در ترازهای بالا در پژوهش کموشجو و همکاران (۱۹۹۸)، عامل گردش سیکلونی در ترازهای میانی و پایینی در پژوهش فلونی و همکاران (۲۰۱۶)، عامل کم‌فشار بریده در پژوهش بالتاجی و همکاران (۲۰۱۷)، عامل تراف عمیق مستقر بر غرب ایران و چرخندگی مثبت در اکثر مطالعات داخلی از جمله احمدی و جعفری (۲۰۱۵)، رحیمی و حاتمی (۲۰۱۶)، حبیبی و همکاران (۲۰۱۹)، میریان و همکاران (۲۰۲۰)، حسینی صدر و همکاران (۲۰۲۰) و بیرانوند و همکاران (۲۰۲۲)، عامل منبع رطوبت که در تحقیق حاضر همانند تحقیقات احمدی و جعفری (۲۰۱۵) حسینی صدر و همکاران (۲۰۲۰) و بیرانوند و همکاران (۲۰۲۲) از آب‌های عرض‌های جنوبی تأمین شده است.

در پایان با توجه به مستعد بودن حوضه گرگانرود از نظر وقوع سیل، جهت پیشگیری از وقوع و آمادگی در زمان وقوع سیل‌های احتمالی آینده اولاً باید با برخی اقدامات نظیر آبخیزداری، آبخوان‌داری، جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی، توجه به کاربری مناسب اراضی، آزادسازی مسیرهای سیلاب بویژه از سازه‌های انسان ساخت و سایر

اقدامات احتمال وقوع سـیلاب و اثرات مخرب آن را کاهش داد و ثانیاً در صورت پیش‌بینی تشکیل سیکلون در مناطق شمال‌شرقی ایران باید هشدارهای لازم برای احتمال وقوع بارش‌های سیل‌زا صادر شود.

منابع

1. Baltaci, H. (2017). Meteorological analysis of flash floods in Artvin (NE Turkey) on August 24, 2015, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 1-23. https://doi.org/10.5194/nhess-2016-404.2017.
2. Beiranvand, I., Gabdomkar, A., Abbasi, A., & Khodagholi, M. (2022). Statistical-Synoptic Analysis of April 2019 Heavy Rainfall in Doroud-Boroujerd Basin. *Journal of Natural Environmental Hazards 11*(32): 169-188. https://doi.org/10.22111/jneh.2022.38564.1806.
3. Dayan, U., Nissen, K., & Ulbrich, U. (2015). Atmospheric conditions inducing extreme precipitation over the eastern and western Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2525-2544. https://doi.org/10.5194/nhess-15-2525-2015.
4. Feloni, E., Nastos & Matsangouras, I.T. (2016). Seasonal synoptic characteristics of heavy rain events in the Attica Region. *Perspectives on Atmospheric Sciences* 391–396. https://doi.org/10.1007/978-3-319-35095-0-55.
5. Freer, J., Beven, K.J., Neal, J., Schumann, G., Hall, J., & Bates, P. (2011). Flood risk and uncertainty. *Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards* 190-233. https://doi.org/190-233. 10.1017/CBO9781139047562.008.
6. Gasemifar, E., Naserpour, S., & Arezomandi, L. (2017). Analysis of synoptic patterns reated to extreme precipitation over west of Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazarts 4*(2): 69-86. (In Persian)
7. Ghavidel Rahimi, Y., & Hatami, D. (2016). Analysis of heavy rainfall led to flood risk on 27 February 2010 in eyvangharb city (in west of Iran). *Journal of Geography Space 16*(55): 1-16. (In Persian)
8. Halabian, A., Nikandish, N., & Akbari, M. (2019). Synoptic and dynamic analysis of flood generating systems in Mazandaran. *Watershed Engineering and Management 11*(1): 129-146. (In Persian). https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.108884.1246.
9. Hoseini Sadr, A., Mohammadi, G., Abdoul Alizade, F., & Khjaste Golamei, V. (2020). Analysis of synoptic mechanisms of heavy rainfall of 14th of April 2017 in Northwest Iran. *Geography and Planning 23*(70): 79-100. (In Persian)
10. Karianne, Ø., Müller, M., Palerme, C., & Tveito, O.E. (2023). Recent changes in circulation patterns and their opposing impact on extreme precipitation at the west coast of Norway. *Weather and Climate Extremes* 39: 100530, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100530.
11. Kheradmand, S., Seidou, O., Konte, D., & Bohari Barmou Batoure, M. (2018). Evaluation of adaptation options to flood risk in a probabilistic framework. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 19: 1–16.
12. Komuscu, A.U., Erkan, A., & Çelik, S. (1998). Analysis of meteorological and terrain features leaing to the Izmir flash floods. *Natural Hazards* 18: 1-25.
13. Mastrangelo, D., Horvath, K., Riccio, A., & Miglietta, M. (2011). Mechanisms for convection development in a long-lasting heavy precipitation event over south eastern Italy. *Atmospheric Research* 100: 586–602.
14. Mirian, M., Karampoor, M., Moradi, M., & Ghaemi, H. (2020). Identifying dynamic and thermodynamic patterns of winter heavy rainfall in Iran (1960-2010), a case Study: 1974/12/05 Heavy Rainfall. *Physical Geography Research Quarterly 52*(1): 95-111. (In Persian). https://doi.org/10.22059/jphgr.2020.286988.1007428.
15. Mohamadei, B., & Masodeian, A. (2010). Synoptic analysis of heavy precipitation events in Iran. *Geography and Development 8*(19): 47-70. (In Persian). https://doi.org/10.22111/gdij.2010.1108.
16. Omidvar, K., Sepandar, N., & Shafiee, S. (2018). Synoptic and thermodynamic analysis of heavy precipitation in the Province of Kermanshah from October27 to 30, 2015. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR) 27*(107): 237-252. (In Persian). https://doi.org/10.22131/sepehr.2018.33581.
17. Rezacova, D., Kaspar, M., Muller, M., Sokol, Z., Kakos, V., Hanslian, D., & Pesice, P. (2005). A comparison of the flood precipitation episode in August 2002 with historic extreme precipitation events on the Czech territory. *Atmospheric Research 77*(1–4): 354-366. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.10.008.
18. Zheng, Z., & Wang, D. (2022). Observations of heavy short-term rainfall hotspots associated with warm-sector episodes over coastal South China. *Atmospheric Research* 276: 106273, ISSN 0169-8095. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106273.
19. Zhang, Y., Sun, j., Zhu, L., Tang, H., Jin, S., & Liu, X. (2021). Comparison of two types of persistent heavy rainfall events during sixteen warm seasons in the Sichuan Basin. *Atmospheric and Oceanic Science Letters 14*(6): 100094, ISSN 1674-2834. https://doi.org/10.1016/j.aosl.2021.100094.